

El éxito de las teorías científicas, en particular de la teoría de la gravedad de Newton, condujo al científico francés marqués de Laplace, a principios del siglo XIX, a sostener que el universo era completamente determinista. Ello significa que Laplace creía en la existencia de un conjunto de leyes científicas que nos permitirían, al menos en principio, predecir todo lo que ocurriría en el universo. La «única» información que necesitarían estas leyes sería el estado completo del universo en un momento dado. Esto se denomina una «condición inicial» o «condición de frontera». (Una frontera puede referirse a una frontera en el espacio o en el tiempo; una condición de frontera en el espacio es el estado del universo en su borde exterior, si es que lo tiene). Basándose en un conjunto completo de leyes y en las condiciones iniciales y de fronteras apropiadas, Laplace creía que deberíamos poder calcular el estado completo del universo en cualquier otro instante. Probablemente, la necesidad de las condiciones iniciales es intuitivamente obvia: diferentes estados presentes conducirán, obviamente, a estados futuros diferentes. La necesidad de condiciones de frontera en el espacio es un poco más sutil, pero el principio es el mismo. Las ecuaciones en que se basan las teorías físicas pueden tener generalmente soluciones muy diferentes, y debemos contar con las condiciones iniciales y de frontera para decidir cuáles de ellas hemos de considerar. En cierto modo, es como decir que nuestra cuenta bancaria depende no sólo de las sumas que ingresamos o retiramos, sino también de las condiciones iniciales o de frontera de cuál era el valor de la cuenta en el momento de su apertura.

Si Laplace estuviera en lo cierto, entonces, dado el estado del universo en el presente, estas leyes nos podrían decir su estado tanto en el futuro como en el pasado. Por ejemplo, dadas las posiciones y velocidades del Sol y los planetas, podemos utilizar las leyes de Newton para calcular el estado del sistema solar en cualquier instante anterior o posterior. El determinismo parece bastante obvio en el caso de los planetas; al fin y al cabo, los astrónomos hacen predicciones muy precisas de acontecimientos como los eclipses. Pero Laplace fue más allá, y supuso que había leyes semejantes que gobernaban todo lo demás, incluido el comportamiento humano.

¿Es realmente posible que los científicos lleguen a calcular en el futuro cuáles serán nuestras acciones? Un vaso de agua contiene más de 10^{24} (un 10 seguido de 24 ceros) moléculas. En la práctica, no podemos esperar saber nunca el estado de cada una de ellas, y mucho menos, pues, el «estado completo» del universo, ni tan siquiera el de nuestro cuerpo. Aun así, decir que el universo es determinista significa que, aunque no tengamos la potencia mental necesaria para efectuar el cálculo, nuestro futuro está, sin embargo, determinado.

Esta doctrina del determinismo científico halló una fuerte oposición por parte de mucha gente, que pensó que quedaba infringida la libertad de Dios de hacer que el mundo funcionara como Él creyera conveniente, pero siguió siendo la suposición habitual de la ciencia hasta principios del siglo XX. Uno de los primeros indicios de

que esta creencia debía ser abandonada surgió cuando los científicos británicos lord Rayleigh y *sir* James Jeans calcularon la cantidad de radiación de cuerpo negro que un objeto caliente, como por ejemplo una estrella, debe radiar (recordemos, del capítulo 7, que cualquier cuerpo material, al ser calentado, emite radiación de cuerpo negro).

Según las leyes conocidas en aquel tiempo, un cuerpo caliente debería emitir por igual ondas electromagnéticas en todas las frecuencias. Si esto fuera verdad, radiaría la misma cantidad de energía en todos los colores del espectro de la luz visible, y para todas las frecuencias de microondas, radioondas, rayos X, etc. Recordemos que la frecuencia de una onda es el número de veces que ésta oscila por segundo, es decir, el número de «ondas por segundo». Matemáticamente, que un cuerpo caliente emitiera por igual ondas a todas las frecuencias significaba que debería emitir la misma cantidad de energía tanto en ondas con frecuencias comprendidas entre cero y un millón de ondas por segundo, como en ondas con frecuencias comprendidas entre uno y dos millones de ondas por segundo, dos y tres millones de ondas por segundo, y así sucesivamente, e indefinidamente. Supongamos que se emite una unidad de energía en forma de ondas con frecuencia comprendida entre cero y un millón de ondas por segundo, y así en cada intervalo. Entonces, la cantidad total de energía radiada en todas las frecuencias es la suma de uno más uno más uno... indefinidamente. Como no hay límite para el número de ondas por segundo que pueda contener una onda, la suma de estas energías es una suma sin fin. Según este razonamiento, la energía total radiada debería ser infinita.

Para evitar este resultado evidentemente absurdo, el científico alemán Max Planck sugirió en 1900 que la luz, los rayos X y otras ondas electromagnéticas sólo podrían ser emitidos en ciertos paquetes discretos, que denominó «cuantos». En la actualidad, llamamos fotón al cuanto de luz. Cuanto mayor es la frecuencia de la luz, mayor es el contenido de energía de «cuantos». Por lo tanto, aunque todos los fotones de cualquier color o frecuencia dados son idénticos, la teoría de Planck establece que los fotones de diferentes frecuencias difieren en la cantidad de energía que transportan. Esto significa que en la teoría cuántica la luz «más tenue» de un color dado cualquiera —la luz transportada por un solo fotón— tiene un contenido energético que depende de su color. Por ejemplo, como la frecuencia de la luz violeta es el doble que la de la luz roja, un cuanto de luz violeta tiene el doble de energía que uno de luz roja. Así pues, la cantidad más pequeña posible de la luz violeta es el doble de grande que la cantidad más pequeña posible de luz roja.

¿Cómo resuelve esto el problema del cuerpo negro? La cantidad más pequeña de energía electromagnética que un cuerpo negro puede emitir en una frecuencia dada es la transportada por un fotón de dicha frecuencia, energía que es mayor a frecuencias más elevadas. A frecuencias suficientemente elevadas, la cantidad de energía en un solo fotón sería mayor que la disponible para todo el cuerpo, en cuyo caso no se emitiría luz, poniendo fin de este modo a la suma anteriormente ilimitada. Así, en la

teoría de Planck, la radiación a frecuencias elevadas quedaría reducida y, en consecuencia, la tasa con que el cuerpo pierde energía sería finita, resolviendo el problema del cuerpo negro.

La hipótesis cuántica explicaba muy satisfactoriamente la tasa observada de emisión de radiación de los cuerpos calientes, pero sus consecuencias sobre el determinismo no fueron advertidas hasta 1926, cuando otro científico alemán, Werner Heisenberg, formuló su famoso principio de incertidumbre.

El principio de incertidumbre (o de indeterminación), contrariamente a la creencia de Laplace, afirma que la naturaleza impone límites a nuestra capacidad de predecir el futuro mediante leyes científicas. Esto es debido a que, para poder predecir la posición y velocidad futuras de una partícula, debemos poder medir con precisión su estado inicial, es decir, su posición y velocidad actuales. La manera obvia de hacerlo es enviar luz a la partícula. Algunas de las ondas de luz serán dispersadas por ésta y podrán ser detectadas por el observador, indicando así la posición de la partícula. Sin embargo, la luz de una longitud de onda determinada sólo tiene una sensibilidad limitada: no es posible determinar la posición de la partícula con precisión mayor que la distancia entre crestas sucesivas de la onda. Por lo tanto, si deseamos medir con precisión la posición de la partícula, debemos utilizar luz con longitud de onda corta, es decir, con frecuencia elevada. Por la hipótesis cuántica de Planck, sin embargo, no podemos utilizar una cantidad de luz arbitrariamente pequeña: como mínimo, debemos utilizar un cuanto, cuya energía es mayor a frecuencias más elevadas. Así, cuanto mayor sea la precisión con que queramos medir la posición de una partícula, más energético será el cuanto de luz que debemos lanzar contra ella.

Según la teoría cuántica, incluso un solo cuanto de luz perturbará la partícula y modificará su velocidad de forma impredecible. Y cuanto más energético sea el cuanto de luz utilizado, mayor será la perturbación esperada. Esto significa que, para medir con más precisión la posición, tenemos que utilizar un cuanto más energético, con lo que la velocidad de la partícula se verá más perturbada. Por tanto, con cuanta mayor precisión tratemos de medir la posición de la partícula, menor será la precisión con que podremos medir su velocidad, y viceversa. Heisenberg demostró que la incertidumbre en la posición de la partícula, multiplicada por la incertidumbre en su velocidad, multiplicada por la masa de la partícula, nunca puede ser menor que un valor dado. Esto significa, por ejemplo, que si reducimos a la mitad la incertidumbre en la posición, se duplica la incertidumbre en la velocidad, y viceversa. La naturaleza siempre nos obligará a participar en esta negociación.

¿Cuán mala es esta negociación? Depende del valor numérico de ese «cierto valor fijo» que mencionamos anteriormente. Dicho valor es conocido como la constante de Planck, y es un número muy pequeño. Como la constante de Planck es muy pequeña, los efectos de esta negociación, y de la teoría cuántica en general, no son directamente observables en nuestra vida cotidiana, igual que ocurre con los efectos de la relatividad. (Aunque la teoría cuántica afecta directamente a nuestra vida, ya